

ГАЗИФИКАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

П.П. Ткаченко, М.В. Белоногов

Научный руководитель – доцент П.А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Постоянный рост цен на энергоносители привел к тому, что использование отходов угле- и нефтепереработки в качестве компонентов топлив становится все более массовым [1-2]. В силу низкой калорийности, высокой зольности и ряда других свойств отходов, их непосредственное сжигание не имеет особого смысла ни с экономической, ни с энергетической точек зрения [1-2].

В данной работе мы предлагаем конвертировать горючие отходы переработки угля и нефти в сингаз [3,4] с помощью мощного потока непрерывного лазерного излучения [5]. Данный подход позволяет при минимальных затратах производить топливно-воздушную смесь с достаточно высокой концентрацией горючих компонентов (CO , H_2 и CH_4). Под действием лазерного излучения, происходит точечный нагрев водо-угольной смеси, приводящий к газификации топлива [6,7]. Процессы классического пиролиза углеводородов [3,4] обычно требуют нагрева всей массы перерабатываемого топлива до высоких температур ($\sim 1000^\circ\text{C}$) и наличия паро-газового агента, интенсифицирующего теплообмен. Применение светового излучения для непосредственного подвода тепла к поверхности капель топлива позволяет работать с более низкими средними температурами топлива.

Нами была проведена серия экспериментов, показывающая основные особенности процесса газификации водо-угольного топлива (ВУТ) непрерывным лазерным излучением. Смесь готовилась из отходов углепереработки (филер-кек угля марки Г с содержанием твердой части ~ 64 вес. % и размером частиц не более 200 мкм, а также воды ~ 36 вес.%). Схема эксперимента представлена на рис. 1. Непрерывный лазер ($\lambda=533$ нм) мощностью 1Вт инициировал точечный нагрев капли топлива (массой ~ 150 мг), сфокусированным излучением. Интенсивность излучения варьировалась подстройкой мощности лазера в диапазоне 200-1400 Вт/см². Порция топлива помещалась на специальном держателе внутри медной камеры, стоящей на платформе электронных аналитических весов. Лазерное излучение заводилось через специальное окно, продукты газификации откачивались через выходной патрубок газоанализатора. Данная схема позволяет провести три вида измерений для характеристики процессов, протекающих в образце топлива под действием излучения. Измерение массы газифицированного топлива с количеством поглощенной энергии для разных интенсивностей излучения измерялось с помощью аналитических весов (при отключенных патрубках газоанализатора, чтоб исключить искажения показаний за счет сил упругости). Анализ химического состава сингаза проводился с помощью газоанализатора в режиме кольцевой прокачки газа через рабочую камеру установки. Температура на облучаемой поверхности топлива контролировалась с помощью тепловизора Testo-885-2, смотревшего на образец под близким к нормали углом (при снятом стекле оптического окна). Таким образом, проведенные измерения позволили достаточно детально охарактеризовать происходящие при лазерной газификации процессы.

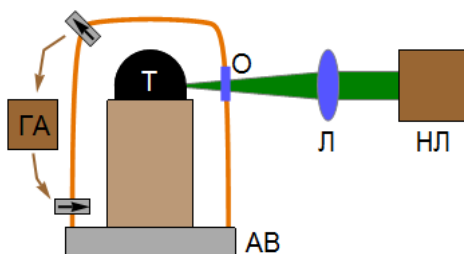


Рис.1. Схема экспериментальной установки. На схеме показаны непрерывно излучающий лазер (НЛ), фокусирующая линза (Л), оптическое окно(О), аналитические весы (АВ), порция ВУТ (Т) и газоанализатор (ГА)

Зависимости массы газифицированного топлива от времени воздействия излучения (т.е. от поглощенной энергии) показаны на рис. 2а. Видно, что кривые, представляют собой квази-линейные зависимости. Наклон кривых растет с ростом интенсивности лазерного излучения, однако, очевидно, что скорость газификации ВУТ при интенсивности $I \sim 770$ Вт/см² значительно ниже, чем при больших интенсивностях. В то же время, рост интенсивности излучения с 940 до 1300 Вт/см² приводит к квази-линейному росту скорости газификации без заметных скачков. Т.е. газификация непрерывным лазерным излучением имеет резкий скачок эффективности в диапазоне ($770 \text{ Вт/см}^2 < I < 940 \text{ Вт/см}^2$). При превышении порогового значения интенсивности, эффективность оптической накачки энергии существенно возрастает. Данный факт позволяет заключить, что медленная потеря массы образцом при низких интенсивностях излучения объясняется преимущественно выходом водяного пара и медленным пиролизом угля. В случае же, когда интенсивность выше 770 Вт/см², термическое разложение угля резко ускоряется.

Из рис. 2а видно, что длительное воздействие лазерного излучения приводит к газификации до 30% массы ВУТ. Существенную часть продуктов составляет водяной пар и, судя по тому, что в течение длительного времени наблюдается монотонный рост массы газо-паровой смеси, соотношение водяного пара и остальных компонентов сингаза меняется слабо. Предварительные эксперименты по лазерной газификации сухого угольного порошка показывают, что в течение 5 минут образец может потерять до 6% исходной массы. Таким образом, можно ожидать соотношение масс водяного пара и продуктов газификации угля до 5:1.

Проведенные исследования состава газовой смеси внутри рабочего объема экспериментальной установки показали, что с ростом интенсивности лазерного излучения наблюдается не монотонный рост концентрации газообразного оксида углерода до 6800 ppm, оксидов азота до 20 ppm, водорода до 930 ppm и диоксида серы до 80 ppm (рис. 2б). Подбирая интенсивность излучения можно управлять соотношением компонентов сингаза, а также скоростью газификации топлива. Производство диоксида серы и водорода стартует при минимальных интенсивностях лазерного излучения и плавно растет с ростом интенсивности. Производство оксида углерода и оксидов азота демонстрирует скачок концентраций этих газов при интенсивностях $I > 400 \text{ Вт/см}^2$ и далее, при $I > 800 \text{ Вт/см}^2$. Данные скачки эффективности газификации, скорее всего, обусловлены температурными порогами пиролиза компонентов угля и порогом окисления углерода, достигающимися, при определенных значениях теплового потока, создаваемого лазерным излучением.

Измерения температуры поверхности ВУТ в пятне фокусировки лазерного излучения, проведенные с помощью тепловизора, показали, что в зависимости от интенсивности излучения температура колеблется в диапазоне 500-700°C. При этом средняя температура порции топлива массой 150-200 мг не превышает 300-400°C. Для проведения этих измерений стекло с окна рабочей камеры было снято, что могло привести к небольшому снижению температуры поверхности топлива за счет притока холодного воздуха извне.

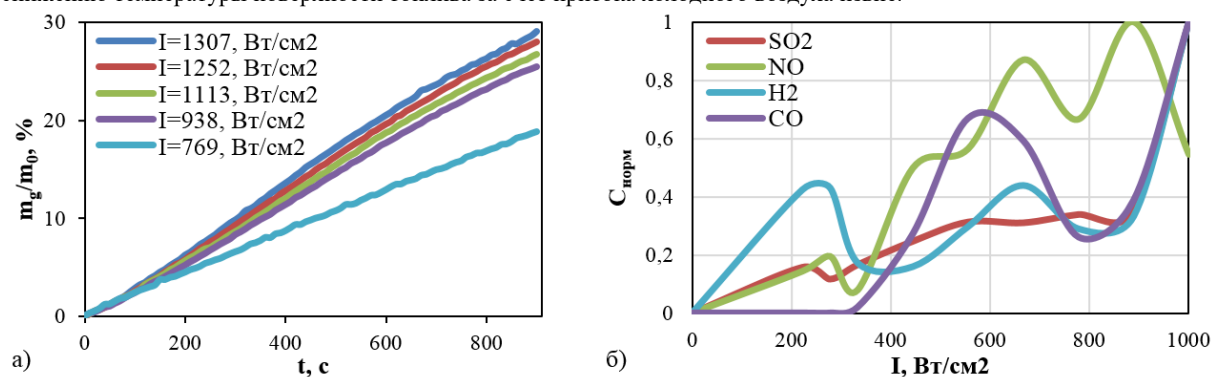


Рис. 2 Зависимость изменения массы газифицированной топливной смеси от времени лазерного облучения для разных интенсивностей (а). Зависимость нормированных концентраций компонентов сингаза от интенсивности лазерного излучения (б)

Таким образом, в работе продемонстрирована эффективность свето-индуцированной газификации водоугольной суспензии непрерывным лазерным излучением, которая позволяет производить сингаз с достаточно высокой концентрацией горючих компонентов. Показано наличие порога интенсивности лазерного излучения (770 Вт/см²), при переходе которого процесс резко ускоряется за счет усиления производства монооксида углерода. Производство диоксида углерода при воздействии лазерного излучения на ВУТ не наблюдалось. Применение непрерывных источников света относительно малой мощности позволяет производить эффективную конверсию отходов углеобогащения в горючий газ. Применение сфокусированного солнечного света в качестве источника энергии для свето-индуцированной конверсии промышленных отходов позволяет в перспективе создать эффективный и дешевый метод утилизации промышленных отходов.

Литература

1. Glushkov D.O., Lyrshchikov S.Y., Shevyrev S.A. and Strizhak P.A., Burning Properties of Slurry Based on Coal and Oil Processing Waste // *Energy & Fuels*. – 2016. – V 30 (4). – P. 3441 – 3450.
2. Kijo-Kleczkowska A., Combustion of coal-water suspensions // *Fuel*. – 2011. – V 90 (2). – P. 865 – 877.
3. Oh G., Ra H.W., Yoon S.M., Mun T.Y., Seo M.W., Lee J.G., Yoon, S.J. Gasification of coal water mixture in an entrained-flow gasifier: Effect of air and oxygen mixing ratio // *App. Therm. Eng.* – 2018. – V. 129. – P. 657 – 664.
4. Chen Z., Zhang X., Han W., Gao L., Li S. Exergy analysis on the process with integrated supercritical water gasification of coal and syngas separation // *App. Therm. Eng.* – 2018. – V. 128. – P. 1003 – 1008.
5. Seyitliyev D., Kholikov K., Grant B., San O., Er A.O. Laser-induced hydrogen generation from graphite and coal // *Int. J. of Hydrogen Energy*. – 2017. – V 42 (42). – P. 26277 – 26288.
6. Egorov R. I., Strizhak P. A. The light-induced gasification of waste-derived fuel // *Fuel*. – 2017. – V. 197. – P. 28 – 30.
7. Zaitsev A.S., Egorov R.I., Strizhak P.A. Light-induced gasification of the coal-processing waste: Possible products and regimes // *Fuel*. – 2018. – V. 212. – P. 347 – 352.